



УДК 621.313

**К ВОПРОСУ РАСТВОРИМОСТИ ГАЗОВ В
ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ****THE GAS SOLUBILITY PROBLEM IN
TRANSFORMER OIL**

Давиденко Ирина Васильевна, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: inguz21@yandex.ru. Тел.: +7(922)619-19-88

Кузина Татьяна Сергеевна, магистрант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: kuzichka191@yandex.ru, Тел.: +7(952)136-28-03

Irina V. Davidenko, Doctor Sc., Prof., Department « Electric Machines », Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: inguz21@yandex.ru. Ph.: +7(922)619-19-88

Tatyana S. Kuzina, Master student, Department «Electric Machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kuzichka191@yandex.ru. Ph.: +7(952)136-28-03

Аннотация: Значения коэффициентов растворимости газов в трансформаторном масле важны для получения результатов анализа растворенных в масле газов маслonaполненного оборудования и корректной их интерпретации, в том числе для анализа свободных газов из газового реле. В работе проанализированы факторы, влияющие на значения коэффициентов растворимости, на основе зарубежных и отечественных источников. Более подробно рассмотрена температурная зависимость коэффициентов растворимости и предложена формула ее учета при анализе свободных газов газового реле.

Abstract: Gas solubility factor values in transformer oil are of paramount importance because they provide an opportunity to study results of dissolved gases in oil-filled equipment, to make a correct interpretation of results and to analyze free gases in gas relay. On the basis of foreign and domestic sources this paper considers factors which have impact on gas solubility factor values. Temperature dependence of gas solubility factors is discussed in more detail and analytical expression for its calculation is offered by authors with respect to the analysis of free gases in gas relay.

Ключевые слова: коэффициент растворимости газа; трансформаторное масло.

Key words: gas solubility factor; transformer oil.

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАСТВОРИМОСТЬ
ГАЗОВ В МАСЛЕ**

Растворимость газов в трансформаторном масле характеризуется коэффициентом Оствальда B , который определяется, как растворимость объемов газа в одном объеме жидкости, что находится в равновесии при заданных парциальном давлению газа и температуре. Коэффициенты B , необходимы при интерпретации результатов АРГ из воздуха газового реле. Кроме того, растворимость газов необходимо учитывать при идентификации вида дефекта, расчета скоростей изменения концентраций. Общеизвестно, что коэффициенты растворимости газов в трансформаторном масле зависят от температуры мала и атмосферного давления. Однако, в зарубежных стандартах МЭК [1-5]), выпущенных в разные года, зарубежных статьях [6] и отечественных стандартах [7,8] и работах [9] приводятся разные значения

коэффициентов растворимости при одной температуре и атмосферном давлении (Табл.1).

В работе [10] сказано, что величина растворимости может зависеть от сорта масла, а также степени его старения. В МЭК 60567-2011 [2], также утверждается, что коэффициент растворимости зависит от плотности масла, а значит и от марки масла. Сравнивая значения таблицы 1 можно предположить, что в отечественном РД 153-34.0-46.302-00 [7], выпущенном в 2000 г, воспроизводятся данные растворимости газов МЭК 567 [1], выпущенного в 1977 г. Между тем, с тех пор за рубежом и в РФ (с 1985 г) стали выпускаться марки масла, произведенные по гидрокрекинговой технологии, отличающиеся плотностью от марок, выпускавшихся ранее. На наш взгляд, данные по растворимости газов РД 153 34.0-46.302-00 [7] устарели.

Таблица 1.
Значения коэффициентов растворимости газов
при 20 °С и 25 °С

Газ	Источники						
	[1]	[3]	[4]	[5]	[7]	[6]	[8,9]
H ₂	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	1,20	0,05
O ₂	0,17	0,13	0,17	0,14	0,17	1,00	0,15
N ₂	0,09	0,07	0,09	0,07	0,09	1,10	0,09
CO	0,12	0,10	0,13	0,10	0,12	1,03	0,12
CO ₂	1,08	0,93	1,09	0,90	1,08	0,83	1,08
CH ₄	0,43	0,34	0,43	0,34	0,43	0,90	0,40
C ₂ H ₂	1,20	1,00	1,24	0,94	1,20	0,83	1,20
C ₂ H ₄	1,70	1,47	1,84	1,35	1,70	0,80	1,75
C ₂ H ₆	2,40	2,18	2,82	1,99	2,40	0,78	2,78

В работе [9] показано, что газы в масле ГК с присадкой бетол и без нее обладают разной растворимостью. Таким образом, присадки, используемые в трансформаторных маслах, могут влиять на их способность растворять газы. Использование разных методов при определении коэффициентов растворимости тоже может влиять на результат. В работе [11] замечено, что под влиянием электрического поля растворимость газа в трансформаторном масле может изменяться вследствие явления электрострикции. Хотя такие изменения и незначительны. Кроме того, в этой работе приводятся графики влияния на растворимость газов в масле атмосферного давления.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСТВОРИМОСТЬ ГАЗА В МАСЛЕ

По зарубежным и отечественным источникам анализировалась зависимость растворимости газов от температуры. В таблице 2 приведены данные 5 источников [6,11,9,12,14]. В работе [9] приведены

коэффициенты растворимости, полученные при 20°С и 45°С, для 10 образцов различных марок отечественных и импортных масел. Там же отмечено, что наиболее отличаются коэффициенты масел марок ТСП (отечественное) и Nitro 10 ХТ (импортное). Было принято решение на основе данных [9] рассчитать средние значения коэффициентов растворимости для двух температур по отечественным маркам масел, наиболее широко применяемых в эксплуатации силовых трансформаторов в настоящее время. Результаты анализа приведены в таблице 2. Из расчета исключили коэффициенты всех импортных масел, так как, по нашим данным, они используются в 1% парка трансформаторов РФ и коэффициенты масла ТСП из-за максимальных отклонений от средних значений. По нашей статистике, масло ТСП используется в 9% парка трансформаторов РФ и с каждым годом этот процент уменьшается, так как происходит замена старых трансформаторов на новые с маслом ГК, а также происходит заливка трансформаторов маслом ГК при ремонтах. Часть рассмотренных источников дублируют данные МЭК 60599 (1999-2007 гг) [12], например, стандарт Украины СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 [13]. В источниках [11,14] зависимость от температуры описана качественным показателем. Для анализа полученных результатов предложена формула (1):

$$\Delta = \left| \frac{(x - y)}{(x + y)/2} \right| \cdot 100 \quad (1)$$

где x – коэффициент растворимости при 20 °С;
 y – коэффициент растворимости при 45 °С.

Таблица 2.
Изменение коэффициентов растворимости газов в трансформаторном масле с увеличением температуры

Газ	Источники									
	[9]			[6]			[12,13]			[11]
	20°С	45°С	Δ	20°С	45°С	Δ	20°С	50°С	Δ	$\Delta_{20-80^\circ\text{C}}$ $\Delta_{20-60^\circ\text{C}}$
H ₂	0,05	0,043	-15,05	1,20	1,75	+31,43	0,05	0,05	0	рост
O ₂	0,147	0,163	+10,32	1,00	1,03	+2,91	0,15	0,17	+11,8	рост
N ₂	0,085	0,09	+5,71	1,10	1,23	+10,57	0,09	0,09	0	заметный рост
CO	0,119	0,103	-14,41	1,025	1,10	+6,82	0,12	0,12	0	рост
CO ₂	1,130	0,857	-27,48	0,83	0,70	-15,66	1,08	1,00	-7,41	заметное снижение
CH ₄	0,404	0,348	-14,89	0,90	0,83	-7,78	0,40	0,40	0	снижение
C ₂ H ₂	1,255	0,997	-22,91	0,83	0,70	-15,66	1,20	0,90	-25,0	снижение
C ₂ H ₄	1,815	1,339	-30,18	0,80	0,60	-25,00	1,84	1,40	-23,9	снижение
C ₂ H ₆	2,908	2,167	-29,20	0,775	0,55	-29,03	2,78	1,80	-35,2	снижение

Амплитуда расчетной величины Δ выражает силу зависимости, а ее знак указывает на ее характер (прямая или обратная). Результаты расчета отражены в таблице 2.

Все источники дают одно из наибольших отклонений на 10 градусах по C_2H_6 (11 %). Как видно, у всех авторов растворимость с увеличением температуры CO_2 и углеводородных газов снижается, а кислорода увеличивается. Причем у авторов [6,12] наибольшее снижение отмечено у газов с максимальной растворимостью.

В источниках [9,12] отмечено, что максимальное снижение растворимости при повышении температуры наблюдается у CO_2 . Значительная прямая температурная зависимость H_2 приведена только в [6], по данным остальных источников растворимость водорода не зависит от температуры. В [12] говорится, что растворимость азота заметно растет с повышением температуры. Источники [6,9] подтверждают рост растворимости азота при повышении температуры, но он не превышает 10%. Различные источники содержат противоречивые данные по характеру и величине изменения растворимости оксида углерода от температуры. Заметная обратная зависимость приведена в [11] и незначительная в [15]

Сравнив данные отечественных авторов о растворимости газов при 20°C, приведенные в [8] и [6], находим, что растворимость газов C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO_2 в [8] ниже, чем [6].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСТВОРИМОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАРОК МАСЕЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

По итогам анализа статей и стандартов, содержащих сведения о растворимости газов в трансформаторном масле предлагаем пользоваться значениями коэффициентов Оствальда при 20°C, приведенными в [8]. Однако в [8] нет данных о коэффициентах растворимости при другой температуре. Было принято решение рассчитать коэффициенты при 45°C, используя величину изменения коэффициентов растворимости газов от при 20°C до 45°C из источника [9].

На рис.1 штрихпунктирными линиями показано нахождение коэффициентов растворимости при 45°C для коэффициентов при 20°C из [8], с использованием температурной зависимости коэффициентов растворимости из [9] (сплошные линии). Результат такого расчета приведен в таблице 3.

Таблица 3.
Значение коэффициентов Оствальда для отдельных газов

Газ	B_i при 20°C	B_i при 45°C
H_2	0,05	0,05
O_2	0,15	0,16
N_2	0,09	0,095
CO	0,12	0,11
CO_2	1,08	0,73
CH_4	0,40	0,35
C_2H_2	1,20	1,03
C_2H_4	1,75	1,35
C_2H_6	2,78	1,98

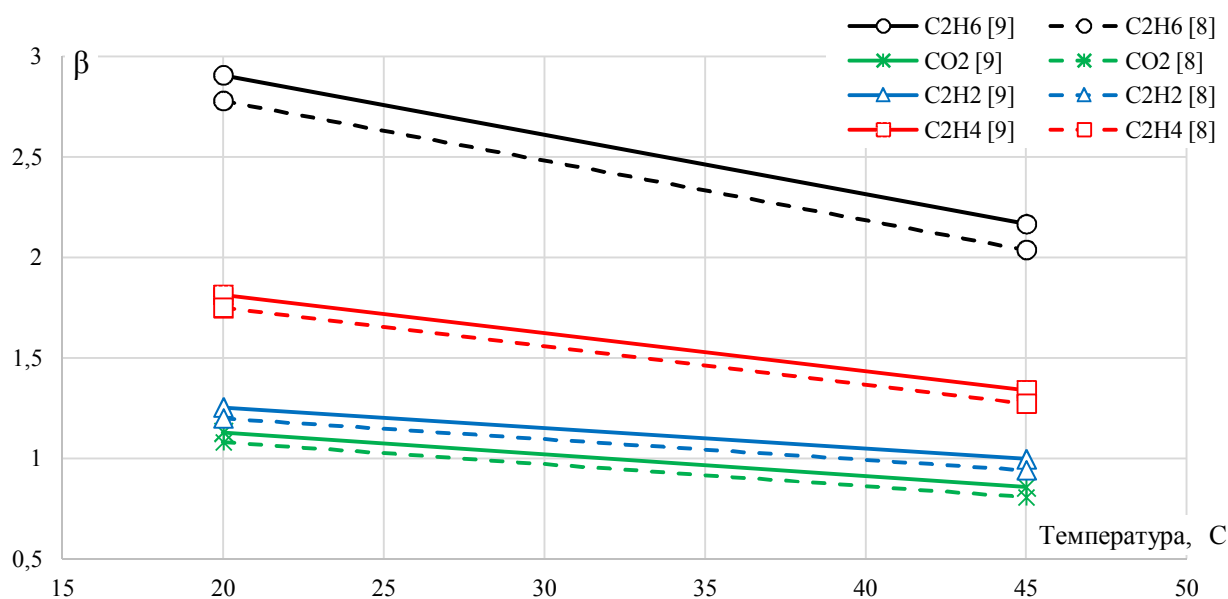


Рис. 1. Нахождение коэффициентов растворимости при 45°C

Значение коэффициенты B_T^i , необходимы при интерпретации результатов анализа газов из газового реле. Кроме того, растворимость газов необходимо учитывать при идентификации вида дефекта, расчета скоростей изменения концентраций. В стандартах [12,13] рекомендовано учитывать температурную зависимость коэффициентов растворимости при оценке АРГ свободных газов газового реле. Приведенный в этой статье анализ влияния температуры на растворимость газов в трансформаторном масле, подтверждает необходимость учета этого фактора. Мы рекомендуем для 20°C и 45°C использовать значения коэффициентов растворимости, приведенные в таблице 3. Значение коэффициентов для промежуточных и более высоких температур предлагаем определять путем интерполяции по формуле (2):

$$B_T^i = \frac{B_{20}^i \cdot 45 - B_{45}^i \cdot 20}{25} + \frac{B_{45}^i \cdot 45 - B_{20}^i}{25} T \quad (2)$$

где T – температура отбора пробы, °C;
 B_{20}^i , B_{45}^i – коэффициенты растворимости i -го газа в масле при 20 и 45 °C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Standard IEC 567 «Guide for sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases», Geneva, 1977.
2. International Standard IEC 60567 «Oil-filled electrical equipment - Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases - Guidance», Geneva, 2011.
3. International Standard IEC 567, Second edition, «Guide for sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases», Geneva, 1992.
4. International Standard IEC 60599 Электрооборудование с заполнением минеральным маслом при эксплуатации – Руководство по толкованию результатов анализа растворенных и свободных газов 2015.
5. IEEE Std C57.104™-2008 Руководящий документ американского института инженеров электриков и электронщиков по интерпретации газов, которые образуются в маслонаполненных трансформаторах.
6. J. B. DiGiorgio, «Dissolved Gas Analysis of Mineral Oil Insulating Fluids» Report, Northern Technology and Testing, USA, pp.1-21, 2005.
7. РД 153 34.0 46.302 00 "Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле, в качестве стандарта организации с правом применения в ДЗО ПАО «Россети».
8. СТО 56947007 29.180.010.094 2011 Методические указания по определению содержания газов, растворенных в трансформаторном масле. Утв. и введ. Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» № 321 от 02.06.2011 г.
9. В.В.Бузаев, Л.А.Дарьян, Ю. М.Сапожников Уточнение коэффициентов растворимости содержащихся в трансформаторном масле газов Журнал Электрические станции 2006 №12.
10. Иоффе Б.В., Косткина М.И., Витенберг А.Г. Коэффициенты распределения и растворимость газов в трансформаторных маслах. — Журнал прикладной химии, 1980, № 10, с. 2280.
11. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. International Standard IEC 60599 Электрооборудование с заполнением минеральным маслом при эксплуатации – Руководство по толкованию результатов анализа растворенных и свободных газов 2007.
13. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 Диагностика маслонаполненного трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа свободных газов, отобранных из газового реле, и газов, растворенных в изоляционном масле. Киев, 2007.
14. Справочник химика / ред. Б.П. Никольский. - Л.: Химия; Издание 2-е, перераб. и доп., 2015. - 709 с.
15. V.G.Arakelian «Taking adsorption phenomena into account in DGA diagnostics», IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2003 vol.19, № 6, pp. 6–8.